



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

FÚZNÍ SYSTÉMY A PROBLEMATIKA JEJICH STÍNĚNÍ

FUSION SYSTEMS AND THEIR SHIELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Roubal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dušan Král

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Michal Roubal

Ročník: 3

ID: 195626

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Fúzní systémy a problematika jejich stínění

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte rešerši problematiky fúzních zařízení. Krátce shrňte historii, popište aktuální stav a překážky pro energetické využití termojaderné fúze.
2. Provedte rešerši problematiky stínění a radiačního poškození materiálů komory fúzních zařízení.
3. Popište problematiku triciového hospodářství (dostupné zdroje, produkce, bilance atd.).
4. Provedte simulaci toku částic na stěny reaktoru a určete míru aktivace materiálů této stěny a potenciál produkce tricia v blanketu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

M. Kikichi, K. Lackner, M. Q. Tran: Fusion physics, IAEA 2012.

A. Sawyer: The Nuclear fusion Handbook - Everything You Need To Know About Nuclear fusion.

J. W. Davisa, M. F. Marchbanks: Materials handbook for fusion energy systems.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Dušan Král

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Citace tištěné práce:

ROUBAL, Michal. *Fúzní systémy a problematika jejich stínění*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127271>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Dušan Král.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma fúzní systémy a problematika jejich stínění jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 10.06.2020

.....

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Dušanu Královi za odborné vedení, trpělivost a cennou pomoc.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou spojenou s jadernou fúzí v souvislosti se snahou o její využití jako zdroje energie pro lidstvo. V první části práce uvádím stručný náhled do historie jejího výzkumu. Dále řeším problematiku možných přístupů jejího dosažení a udržení v technologickém zařízení. Krátce pojednávám o důležitosti jejího ovládnutí. V další části se zabývám existujícími a předpokládanými problémy souvisejícími s radiačním poškozením při jaderné fúzi v technologickém zařízení. V neposlední řadě pojednávám o principu Tritiové hospodářství.

KLÍČOVÁ SLOVA: jaderná fúze, deuterium, tritium, terčik

ABSTRACT

This thesis is concerned with nuclear fusion and its use as a source of energy for humanity. In the first part of my thesis, I will briefly explore the research history of nuclear fusion. Next, I will investigate the various possible issues connected with achieving and sustaining nuclear fusion. I will briefly discuss the importance of mastering it. I will talk about existing and anticipated risks of radiation damage which can occur during nuclear fusion. Lastly, i will discuss the principles of tritium breeding.

KEY WORDS: nuclear fusion, deuterium, tritium, target

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
SEZNAM ZKRATEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
1 ÚVOD.....	12
2 JADERNÁ FÚZE.....	13
2.1 MOTIVACE K FÚZNÍM ELEKTRÁRNÁM.....	13
2.2 HISTORIE	14
2.3 PRINCIP JADERNÉ FÚZE	17
2.3.1 SLUNCE.....	18
2.3.2 ENERGIE UVOLNĚNÁ PŘI FÚZNÍ REAKCI	19
2.3.3 PŘEKÁŽKY DOSAŽENÍ JADERNÉ FÚZE	20
2.3.4 FÚZNÍ PALIVA	23
3 UDRŽENÍ PLAZMATU.....	24
3.1 MAGNETICKÉ UDRŽENÍ.....	24
3.1.1 TOKAMAKY.....	24
3.1.2 STELARÁTORY	25
3.2 INERCIÁLNÍ UDRŽENÍ.....	26
3.2.1 ZPŮSOB DODÁVÁNÍ ENERGIE PALIVU	26
4 RADIAČNÍ POŠKOZENÍ.....	27
4.1 RADIAČNÍ POŠKOZENÍ FÚZNÍCH REAKTORŮ.....	27
4.1.1 RADIAČNÍ POŠKOZENÍ PŘI MAGNETICKÉM UDRŽENÍ	28
4.1.2 RADIAČNÍ POŠKOZENÍ PŘI INERCIÁLNÍM DRŽENÍ	28
4.2 VOLBA MATERIÁLŮ NA STĚNY REAKTORU	28
5 PRODUKCE TRITIA.....	30
5.1 MATERIÁLY NA PRODUKCI TRITIA	30
6 PRAKTICKÁ ČÁST.....	32

6.1 MCNP	32
6.2 MODEL REAKTORU	32
7 ZÁVĚR.....	36
POUŽITÁ LITERATURA	37

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Vazebná energie [13]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-2 Maxwelllovo-Boltzmannovo rozdělení [15]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-3 Coulombova elektrostatická bariéra [2]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-4 Účinný průřez fúze v závislosti na kinetické energii částic [17]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-1 Magnetické udržení – Tokamak [21]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-2 Magnetické udržení plazmatu v zařízeních tokamak (vlevo) a stellarátor (vpravo). Modrá kruhy a šedé šroubovice znázorňují magnetické cívky. Modrá šiba znázorňuje elektrický proud v plazmatu [2]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-3 Inerciální udržení [22]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 6-1 Model simulace</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6-2 Neutronový tok v první vrstvě F82H</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6-3 Neutronový tok v Li_2TiO_3</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6-4 Neutronový tok v druhé vrstvě F82H</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6-5 Neutronový tok ve vrstvě SUS316</i>	<i>35</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Fúzní paliva [19].....</i>	<i>23</i>
--	-----------

SEZNAM ZKRATEK

ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor
JET	Joint European Torus – Společný Evropský Torus
NIF	National Ignition Facility – Národní Zapalovací Zařízení
MCNP	Monte Carlo N-Particle Transport – Monte Carlo N-Částicový transport

SEZNAM SYMBOLŮ

T	teplota	$^{\circ}\text{C}$
E	energie	eV
m	hmotnost	kg
c	rychlost světla	km/s
v_p	Nejpravděpodobnější rychlosti částic	m/s
E_b	vazebná energie atomového jádra	eV
B	hmotnostní schodek	kg
τ_E	doba udržení energie	s
n	hustota plazmatu	m^{-3}

1 ÚVOD

Se stále se zvyšující poptávkou po elektrické energii doprovázené hrozícím nebezpečím globálního oteplování vyvstává otázka na tzv. dokonalý zdroj elektrické energie. Tento dokonalý zdroj by mohly představovat jaderné elektrárny. Ty ovšem nejsou společností obecně přijímány z důvodu obecně rozšířeného strachu z jaderných havárií, které by teoreticky mohly mít katastrofické následky. Odpovědí na otázku ohledně ještě dokonalejšího zdroje energie nemusí ležet příliš daleko od jaderného štěpení: mohlo by jím být jaderné slučování – jaderná fúze. Energii uvolňující se při jaderné, resp. termojaderné fúzi, lidstvo využívá již od nepaměti ve formě tepla a světla z našeho Slunce.

V této bakalářské práci se zabývám jaderným slučováním jako zdrojem pro generování elektrické energie. V první části stručně uvádím objev a historii výzkumu jaderné fúze. Dále se pokouším objasnit fyzikální aspekty a problematiku, které s sebou přináší snaha podmanit si energii z jaderného slučování. Následně se snažím nastínit, proč je jaderné slučování podle mě tzv. dokonalý zdroj energie pro lidstvo a proč je důležitá honba za jeho pokořením. V neposlední řadě představuji koncepty, jak v technologických zařízeních dosáhnout a udržet podmínky pro jeho stabilní a využitelný průběh. Stěžejní částí je řešení jevů, které souvisí s radiačním poškozením a produkcí tritia při jaderné fúzi.

Toto téma jsem si vybral z toho důvodu, že podle mě je jaderná fúze pro lidstvo nejdokonalejším známým zdrojem energie pro získávání elektrické energie v dostatečném množství.

2 JADERNÁ FÚZE

2.1 Motivace k fúzním elektrárnám

Množství celkové spotřebované energie se zvyšuje každým rokem. Pokud bude světové hospodářství pokračovat v rychlém růstu bez omezování spotřeby elektrické energie, bude předpokládaná poptávka po dodávce elektrické energie v roce 2100 čtyřikrát větší než dnes. Za předpokladu přísných ekologických omezení bude poptávka dvakrát větší než dnes. Proto musíme zvážit, jaké typy zdrojů elektrické energie budou tyto požadavky schopny splnit. Dále musíme vzít v potaz, jaké budou vlivy výroby energie na životní prostředí a zdraví všech tvorů na naší planetě. V neposlední řadě musíme zvážit množství paliva na Zemi, potřebného na chod elektráren, které využívají neobnovitelné zdroje energie [1].

V dnešní době má hlavní podíl na výrobě elektrické energie spalování fosilních paliv – pro výrobu přibližně 65 % z celkového množství elektrické energie na světě. V tomto typu elektráren je hlavním problémem množství znečišťujících látek, které tyto zdroje produkují, a tenčící se zásoby paliva. Rozvoj v tomto odvětví se jeví neperspektivní hlavně z důvodu globálního oteplování. Další možností jsou vodní elektrárny, které produkují přibližně 17 % elektrické energie na světě. U nich hlavní problém spočívá v omezeném množství vyrobitelné elektrické energie. Nyní jsou už téměř všechny vhodné vodní toky na světě přehrazeny. Z tohoto důvodu nebude kapacita vodních elektráren schopna pokrýt narůstající poptávku po elektrické energii. V případě dalších obnovitelných zdrojů jako je vítr, příliv a Slunce, které představují přibližně 2 % celkové výroby elektrické energie na světě, je hlavním problémem zajištění plynulosti její dodávky. I za předpokladu dalšího zdokonalování využívání těchto zdrojů, zůstává problémem drahé a obtížné uchování vyrobené elektrické energie. V současnosti nejperspektivnějším využívaným zdrojem pro výrobu elektrické energie jsou jaderné elektrárny, které představují přibližně 17 % celkové výroby elektrické energie. V případě jaderných elektráren jsou hlavními problémy radioaktivní odpad a nebezpečí jaderné katastrofy [1].

Jako ideální zdroj pro výrobu energie (- nejenom elektrické) se jeví fúzní elektrárny. Představovaly by zdroj, který by nezanášel prostředí škodlivými látkami. Z pohledu dostupnosti použitého paliva, kterým je zde deuterium se nepředpokládají problémy. Deuterium je totiž možné celosvětově a dlouhodobě získávat z vody v dostatečném množství. Další výhodou je bezpečnost. Možnost výbuchu nebo roztavení fúzního reaktoru je téměř nulová. Toto je dáno velmi malým množstvím paliva v reaktoru. Jedná se přibližně o jeden gram, který bude stačit k činnosti reaktoru na pár sekund. Pokud nebude docházet k průběžnému doplňování paliva, fúzní reakce uhasne. Další

výhodou fúzní elektrárny je, že neprodukuje žádný radioaktivní odpad. Fúzní palivo sice obsahuje radioaktivní tritium, to se ale bude vyrábět přímo uvnitř elektrárny a následně se v ní bude i spalovat. Další výhodou je relativně malý poločas rozpadu tritia. Do fúzní elektrárny se tedy nebudou muset při běžném provozu přivážet ani z ní vyvážet radioaktivní látky. Naopak problém představuje radioaktivita vlastní konstrukce reaktoru. Tato je způsobena působením neutronů, které vznikly během fúzní reakce. Tyto neutrony reagují s komponenty reaktoru. Tento jev se ale dá omezit vhodnou volbou konstrukčních materiálů. Při vhodné volbě materiálů je aktivita fúzní elektrárny a tepelné elektrárny srovnatelná sto let po odstavení elektráren [1].

2.2 Historie

První zmínku o jaderné fúzi pronesl sir Arthur S. Eddington v roce 1920, kdy na British Association for Advancement of Science v Britském Cardiffu pronesl: “V Slunci probíhá termojaderná syntéza atomových jader vodíku, vzniká helium a uvolňuje se energie. Takto lze vysvětlit stáří Slunce” [2]. Později v roce 1928 byla hypotéza podložena matematicko – fyzikálními rovnicemi a v letech 1938-1939 byla popsána konkrétní sluneční reakce [2].

Objevy v oblasti atomové fyziky jako byl například objev neutronu Jamesem Chadwickem v roce 1932, jaderná přeměna způsobená bombardováním atomu urychlenými elektrony v roce 1932 spolupracovníky Cockcroftem a Waltonem a možnost jaderného štěpení těžších prvků Ottem Hansem a Fritzem Strassmannem v roce 1938, odstartovaly výzkum využití energie vznikající při jaderných reakcích. Niels Bohr následně představil myšlenku, že jaderné štěpení má větší šanci nastat, pokud bude použit Uranu-238 namísto Uranu-235. Dále se zabýval myšlenou, že k jadernému štěpení bude docházet častěji s pomalými neutrony než s rychlými neutrony vzniklými při jaderném štěpení. Obě tato tvrzení byla potvrzena Enrikem Fermim. V projektu Manhattan, který byl odstartován v roce 1939, se Američanům podařilo po šesti letech otestovat první jaderné zařízení v Novém Mexiku 16.července 1945 [3].

V průběhu projektu Manhattan, který se zabýval vývojem jaderné bomby na principu jaderného štěpení, započal také teoretický vývoj vodíkové bomby. Zpočátku se ale toto odvětví výzkumu jevilo jako neperspektivní, protože dosažení potřebných extrémních podmínek bylo podle mnoha vědců nemožné. Po vytvoření první štěpné řetězové reakce roku 1942 v Met Labs v Chicagu, Enrico Fermi spočítal, že při výbuchu atomové bomby nastanou podmínky potřebné pro jadernou fúzi deuterionů; vznikne helium a extrémní množství energie. V letech 1946 až 1949 byl výzkum vodíkové bomby v útlumu. Přednost se dávala zdokonalování již existujícímu principu atomové bomby. Po otestování první sovětské atomové bomby roku 1949 nastal zvrat ve výzkumu. Spojené

státy americké se začali usilovně věnovat výzkumu vodíkové bomby a konstrukci reaktoru na produkci tritia. V roce 1951 v rámci operace Greenhouse bylo při výbuchu vodíkové bomby dosaženo prvního termojaderného hoření na Zemi. Testování jaderných zbraní probíhalo až do roku 1992, kdy bylo po dohodě zakázáno, a výzkum se přesunul především do zařízení na principu inerciálního udržení [4].

V roce 1938 se Američan Arthur Kantrowitz pokusil sloučit jádra vodíku tím, že vyrobí plazma se stejnou teplotou jako má Slunce. Tvar nádoby zvolil toroid, ohřev plazmatu měl probíhat mikrovlnami a plazma chtěl od stěn vakuové komory oddělit magnetickým polem. V první části pokusu zjistil, že se neobjevilo žádné rentgenové záření, proto usoudil, že plazma nemá dostatečnou teplotu, a tak se v druhé části pokusil zvýšit výkon ohřevu, plazma se stalo nestabilní, a tím objevil nestability plazmatu [2].

V Německu vědec Max Steenbeck navrhl toroidální pinč, který pojmenoval Wirbelrohr. Tento koncept byl po druhé světové válce dovezen do Anglie a následně postaven pod vedením Stana Cousinse a Alana Warena. Steenbeckův Wirbelrohr se zalíbil i ruskému vědci L. A. Arcimičovi, který odpovídající zařízení postavil v Moskvě poté, co dostal na starost výzkum jaderné fúze v Sovětském svazu. Po druhé světové válce se výzkumem jaderné fúze zabývaly především Velká Británie, Sovětský svaz a Spojené státy americké [2].

Zajímavou událostí ve výzkumu jaderné fúze bylo oznámení argentinského prezidenta Juana Peróna v dubnu 1951, kdy prohlásil, že Argentina zkrotí termojadernou fúzi. Ukázalo se však, že šlo o nepravdivé informace od Ronalda Richtera, jemuž argentinská vláda financovala výzkum. Tato zpráva však měla pozitivní dopad na výzkum jaderné fúze, protože v řadě zemích vyvolala zájem o ni. Lyman Spitzer v Princetonu v USA sestrojil první stelarátor [2].

V Oxfordu v Clarendon Laboratory se Australský vědec Peter Thonemann na počátku padesátých let zabýval výzkumem jaderné fúze na pinčích. Následně v Harwellu postavil Peter Thonemann toroidální pinč ZETA, který odhalil režim samoorganizovaného plazmatu a otestoval měření teploty elektronů Thomsonovou metodou. V roce 1958 byli na lineárním theta pinči Scylla v Los Almos vyprodukovány první měřitelné fúzní neutrony [2].

V Sovětském Svazu se vědci Adrej Sacharov a Igor Tamman zabývali vývojem reaktoru s magnetickým udržením. V roce 1956 zprovoznili reaktor TMP s toroidálním tvarem, který používal magnetické udržení a v roce 1958 první tokamak. Hlavní rozdíl mezi těmito fúzními reaktory spočíval v materiálu komory reaktoru, který byl u TMP z keramiky, což způsobovalo obrovské ztráty. Naproti tomu tokamak používal celokovovou komoru. V Laboratoři měřících

přístrojů akademie věd SSSR se jednalo, zda je lepší tokamak nebo pinč. Nakonec z důvodu neodstranitelných nestabilit na pinči zvítězil tokamak. Změna ve výzkumu jaderné fúze nastala v roce 1968, poté co Sovětský svaz oznámil pokoření teploty 10 milionů °C v tokamaku T-3A na Mezinárodní konferenci o fyzice plazmatu a řízené termojaderné fúzi v Novosibirsku. Poté, co si Američané ověřili tvrzení Sovětského svazu, nastalo přestavování většiny stellarátorů na tokamaky [2].

Další kroky ve vývoji nukleární fúze se ubíraly především cestou zlepšování jednotlivých částí tokamaku (ohřev plazmatu, supravodivé magnetické cívky, velikost magnetického pole, stěny rektorové komory, zlepšování parametrů plazmatu a objem vakuové komory). Jedním z přelomových tokamaků byl evropský JET, ve kterém se v roce 1997 podařilo dosáhnout rekordního fúzního výkonu 16,1 MW [2].

Nyní se fúzní výzkum soustředí především na projekt ITER neboli International Thermonuclear Experimental Reactor, který byl odstartován roku 1985. Na výzkumu se podílí Čína, Indie, Japonsko, Jižní Korea, Rusko, Spojené státy americké, Evropská unie. ITER bude největší výzkumný fúzní tokamak, který by měl být schopen vyprodukovat až 500MW fúzní energie. ITER by měl dosáhnout prvního plazmatu v roce 2025.

Hlavním účelem projektu bude především:

- testování technologií potřebných pro budoucí fúzní elektrárny,
- dosažení D-T plazmatu, ve kterém bude reakce udržitelná interním ohřevem,
- testování tvorby tritia uvnitř vakuové nádoby,
- bezpečnost provozu fúzního zařízení [5].

Po sestavení prvního plynového laseru v roce 1960 byl odstartován vývoj v oblasti výzkumu jaderné fúze, který se principiálně liší od dosavadního: Dosažení podmínek potřebných pro jadernou fúzi by mělo být zajištěno generováním intenzivních laserových pulsů, následnou implozí a šokovým ohřevem hmoty, přičemž se využívá udržení hmoty setrvačností (inercií). První návrh inerciálního udržení byl představen v roce 1961. Značné problémy pro inerciální udržení spočívají v konstrukci palivových článků a generování dostatečně intenzivních krátkých pulsů [6].

V roce 1984 byl zahájen provoz na laseru ve výzkumném zařízení NOVA v Lawrenceově livermorské národní laboratoři v USA. Tento laser byl schopen vyvinout energii až 10^5 J v 10 laserových svazcích po dobu 10^{-9} sekund. Zajímavostí je, že: „Po tomto okamžik se tak jeho

výkon rovnal dvěstěnásoobku celkového výkonu všech elektráren ve Spojených státech amerických“ [7].

V počátcích výzkumu inerciálního udržení vědci doufali, že pokud bude laserový paprsek o výkonu menším než 1 MJ soustředěn na velice malý prostor, dojde k fúzi. Experimenty ovšem ukázaly, že účinnost předání energie plazmatu pomocí laseru je velice malá. Docházelo k nestabilitám laserového plazmatu, které měly za následek odražení většiny energie generované laserem. Dalším problémem bylo tzv. generování horkých elektronů, které způsobovalo přehřívání paliva a docházelo ke snížení dosažitelné hustoty paliva. Později bylo zjištěno, že hydrodynamické nestability brání fúznímu palivu implodovat. K pokroku v inerciálním udržení bylo zapotřebí řešit tyto problémy:

- zvětšení palivového článku,
- zvýšení výkonu laserů s krátkou vlnovou délkou.

Tyto požadavky vedly k postavení NIF v Lawrence Livermore National Laboratory ve Spojených státech amerických, s výkon 1.8 MJ [8].

2.3 Princip jaderné fúze

Jaderná fúze neboli jaderné slučování je proces, při kterém se dva prvky srazí a vytvoří těžší prvek. Jedná se o protiklad k jadernému štěpení, při kterém se prvek rozštěpí na dva lehčí prvky. Jaderná syntéza například probíhá ve hvězdách a jejím výsledkem je mimo jiného i produkce tepla a světla. Dosažení podmínek potřebných pro jadernou fúzi ovšem není tak jednoduché. Hlavními kritérii jsou extrémní teplota a tlak. Při těchto extrémních podmínkách se hmota nachází ve 4. skupenství [9].

Čtvrté skupenství hmoty – plazma – je v pozorovaném vesmíru skupenstvím nejrozšířenějším. Pokud dodáme plynu dostatečnou tepelnou energii, dojde k částečné a následně k plné ionizaci látky a z látky se stává plazma. Jeho základní vlastnosti jsou:

- Obsahuje volné nosiče elektrického náboje.
- Vykazuje kolektivní chování:
 - chová se jako celek při vystavení elektrickému poli a magnetickému poli,
 - zároveň si tyto pole samo vytváří.
- Kvazineutrální
 - Kvazineutralita znamená že, v makroskopickém objemu plazmatu je stejný počet kladných a záporných nábojů.

2.3.1 Slunce

Naše Slunce s fúzním výkonem zhruba $3.9 \cdot 10^{26} \text{ W}$ nám dodává svoji energii ve formě tepla a světla nezbytnou pro život na Zemi. Slunce nám dodává svoji energii již několik miliard let, proto můžeme tvrdit, že zdrojem této energie je právě jaderná fúze. Pokud by Slunce produkovalo energii jiným způsobem jako je například spalování uhlí nebo přeměna gravitační potenciální energie na tepelnou energii. Byla by délka života Slunce velice krátká.

Ve Slunci probíhá vícestupňový proces jaderné fúze, přeměny vodíku na helium. Teplota, při které dochází ve Slunci k fúzi je zhruba 10^{12} K . V první části toho procesu probíhá jaderná fúze proton-proton a vznik deuteria společně s energií ve formě gama záření. Ve většině příkladů reakce dvou protonů dojde k pružnému odrazu nikoliv k fúzi. K fúzi dojde pouze v jedné z 10^{26} reakcí. Tento fakt brání Slunce před explozí a řídí rychlost produkce energie. Množství protonů ve středu Slunce je ale tak veliké, že i přes malou frekvenci fúze dochází ke vzniku 10^{12} kg/s deuteria.

Po vzniku deuteria, dochází relativně rychle k fúzi tohoto deuteria s dalším protonem a vzniku He^3 a energie ve formě gama záření. V poslední části toho procesu dochází k fúzi dvou He^3 a vzniku He^4 a dvou protonů. Výsledkem slunečního cyklu je tedy energie 26,7 MeV. Tato energie je úměrná rozdílu hmotnosti neboli hmotnostního schodku vstupních a výstupních prvků. Vstupem jsou zde čtyři H^1 a výstupem He^4 . Energie z této reakce je ve formě kinetické energie vzniklých částic. Ke jaderné fúzi vzniklých He^3 dojde přibližně za 10^5 let.

Slunce bude takto přeměňovat vodík na helium zhruba $5 \cdot 10^9$ let. Poté bude střed hvězdy tvořen převážně heliem a slunce se začne ochlazovat. Následně se Slunce začne působením své vlastní gravitace hroutit, což povede k růstu teploty nitra a expanzi vnějšího obalu. Toto stádium hvězd se nazývá červený obr. Pokud bude teplota uvnitř slunce 10^8 K je šance, že slunce začne opět uvolňovat energii. Tato energie bude výsledkem jaderné fúze helia a uhlíku.

Ve hvězdách s vyššími teplotami mohou být jinými typy jaderných fúzí vytvářeny další prvky. Jadernou fúzí, při které dochází k zisku energie, mohou být vytvářeny prvky s hmotnostním číslem menším než $A=56$. Pro jadernou fúzi prvků za touto hranicí dochází k absorbování energie. Tento jev je způsoben tím, že vazebná energie na jeden nukleon je u vstupních prvků větší než u výstupních prvků. Proto nedochází k uvolnění energie jako například u jaderné fúze D s T, kde je vazebná energie na jeden nukleon vyšší u výstupních prvků.

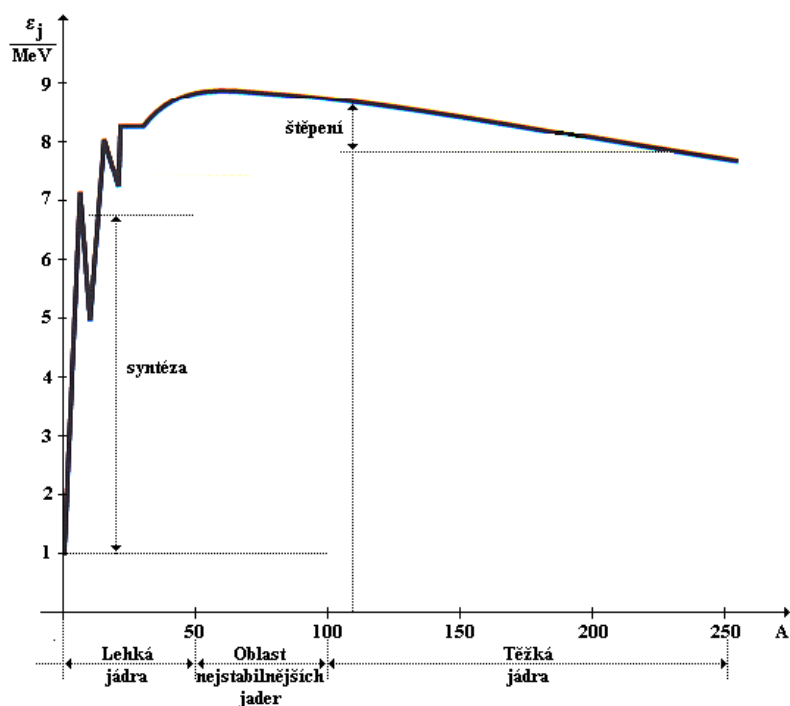
Jaderný cyklus, který probíhá ve Slunci je z hlediska energetického využití na naší planetě velice neefektivní. Je to z důvodu velice malého počtu jaderných fúzí, které probíhají v jednotce objemu.

Ve Slunci může k těmto procesům docházet především z důvodu extrémního množství částic [11].

2.3.2 Energie uvolněná při fúzní reakci

Atomové jádro je systém částic, které jsou navzájem vázány jadernými silami. Pro rozdělení atomového jádra na jednotlivé částice bychom museli systému dodat energii potřebnou na překonání těchto jaderných sil. Dodáním energie systému však dle vzorce (2.1) vzroste i jeho hmotnost. Naopak při slučování jader dochází k opačnému jevu: dochází ke snížení hmotnosti a vyzáření energie systémem. Práce přitažlivých jaderných sil v atomovém jádře nukleonům snižuje energii. Rozdíl energií volných nukleonů a energie jádra, které je z těchto nukleonů tvořeno, říkáme vazebná energie atomového jádra. Tato energie je uvolněna při fúzi, jak je vidět na Obr. 2-1 [12].

$$E = m * c^2 \text{ (J;kg,m/s)} \quad (2.1)$$



Obr. 2-1 Vazebná energie [13]

Na obrázku je znázorněna změna vazebných energií atomového jádra na jeden nukleon, která způsobí hmotnostní schodek při jaderné fúzi $D+T$ a vzniku H^4 . Dále na obrázku můžeme vidět stejný rozdíl energií ale pro jaderné štěpení Uranu²³⁵. Na Obr. 2-1 je vidět rozdíl mezi energií, která je uvolněna při jaderné fúzi D a T , a energií uvolněné při jaderném štěpení U^{238} .

Příkladem fúzní jaderné reakce je:



Uvedená fúzní reakce je aktuálně vzhledem k technologickým požadavkům nejsnáze dosažitelnou na naší planetě.

Dosažením relativních atomových hmotností získáme

$$B = [Ar({}^3_1T) + Ar({}^2_1D) - Ar({}^4_2He) - Ar(n)]m_u = (3,0160494 + 2,0141022 - 4,0026036 - 1,0086649) \cdot 1,6605402 \cdot 10^{-27} = 3,1356 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \quad (2.3)$$

Z výpočtu (2.3) je vidět, že součet hmotností vstupních prvků se liší od součtu hmotností výstupních – jedná se o tzv. hmotnostní schodek. Pokud známe hmotnostní schodek můžeme z něho spočítat energii uvolněnou při fúzní jaderné reakci (2.4).

$$E = B \cdot c^2 = 1,6463 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 17,62 \text{ MeV} \quad (2.4)$$

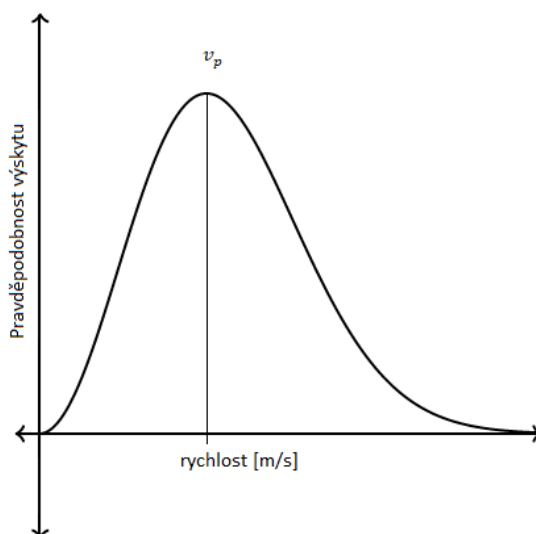
[14]

2.3.3 Překážky dosažení jaderné fúze

Pro dosažení jaderné fúze je potřeba překonat elektrostatické odpuzivé síly atomových jader, vybrat vhodné palivo pro její uskutečnění a v neposlední řadě je nutné dosáhnout kladné energetické bilance. Těmito body se zabývají následující kapitoly.

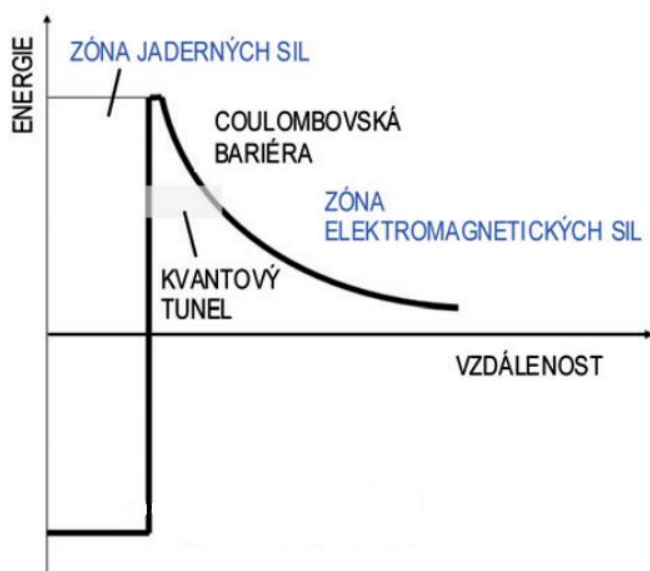
2.3.3.1 Coulombova bariéra

K dosažení jaderné fúze je potřeba překonat elektrostatickou sílu, kterou jsou kladně nabitá atomová jádra vzájemně odpuzována, tzv. Coulombovu bariéru. Pokud ale atomová jádra budou dostatečně blízko sebe, převládne silná jaderná síla, která všechny nukleony přitahuje k sobě a dojde k fúzi. Vzdálenost mezi nukleony, při které převládne jaderná síla, a energie nukleonů potřebná k dosažení této vzdálenosti je znázorněna Coulombovou bariérou. Zvyšování teploty systému způsobuje zvyšování rychlosti částic a tím i zvýšení jejich energie. Nejpravděpodobnější rychlost částic v_p pro danou teplotu je dána Maxwelllovo-Boltzmannovým rozdělením viz Obr. 2-2. Protože se s určitou pravděpodobností vyskytují i částice s vyšší rychlostí než v_p , může dojít k fúzi při nižší teplotě, než která byla určena Coulombovou bariérou.



Obr. 2-2 Maxwellovo-Boltzmannovo rozdělení [15]

Potřebná fúzní teplota může být ještě nižší, protože může dojít k situaci, že částice projdou skrz kvantový tunel, jak je vidět na Obr. 2-3. Tento jev může nastat u částic, které mají energii pod Coulombovou bariérou. I přes toto snižování potřebné energie k fúzi částic, je k fúzi potřeba extrémní teplota pohybující se v rozmezí $10^7 - 10^8$ °C [16].

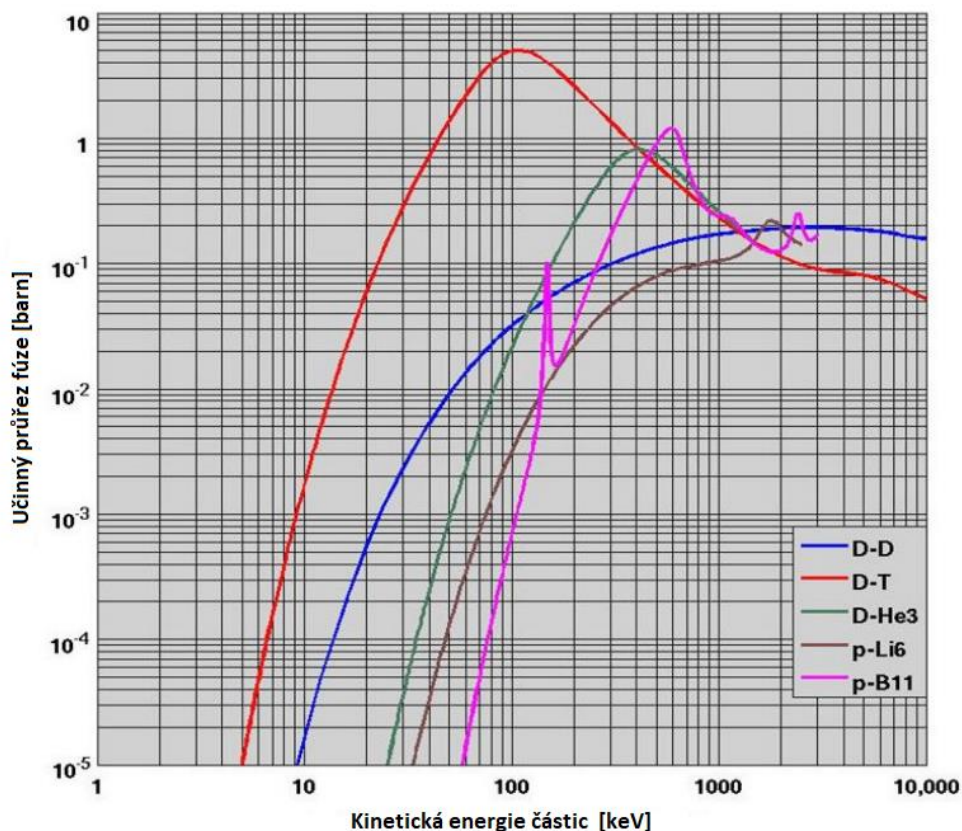


Obr. 2-3 Coulombova elektrostatická bariéra [2]

2.3.3.2 Účinný průřez

Aktuálně se jako palivo používá D a T. Hlavní výhoda reakce D-T spočívá v tom, že účinný průřez reakce deuteria s tritiem je nejvyšší a dosahuje svého maxima při nejnižších kinetických energiích. Deuterium a tritium mají nejmenší vazebnou energii na jeden nukleon. Z tohoto důvodu je

pravděpodobnost, že dojde k fúzi vysoká pro částice s nejnižší energií. Tento fakt je reprezentován křivkou účinného průřezu reakce, která je vidět na Obr. 2-4. V tomto grafu je na vertikální ose kinetická energie částic. Horizontální osa reprezentuje pravděpodobnost, že reakce dvou částic s danou kinetickou energií způsobí fúzní reakci. Z Obr. 2-4 je vidět, že reakce deuteria s tritiem má největší účinný průřez zhruba okolo 100 keV, zatímco pro ostatní reakce nabývá nejvyšší účinný průřez maximálních hodnot ve vyšších kinetických energiích částic [17].



Obr. 2-4 Účinný průřez fúze v závislosti na kinetické energii částic [17]

2.3.3.3 Lawsonovo kritérium

Základní vlastností fúzní elektrárny je energetický zisk. Tento předpoklad byl definován britským fyzikem Johnem Lawsonem. Má znění: „Je třeba, aby součin hustoty plazmatu a doby jeho udržení byl větší než určitá hodnota“ [18]. Po dosažení rovnováhy ve vzorci (2.5) nastane rovnost mezi energií z fúzní reakce a ztrátami v horkém plazmatu s energií potřebnou na ohřev plazmatu. Hustota plazmatu je označována jako n a definuje počet iontů v jednom metru krychlovém. Doba udržení energie τ_E udává, jak rychle se energie ztrácí z plazmatu. Tvar Lawsonova kritéria pro reakci deuteria s tritiem:

$$n \cdot \tau_E > 1,7 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \quad (2.5)$$

Z následující rovnice se jaderná fúze může rozdělit na dva možné přístupy. Prvním je tzv. inerciální udržení, které je charakteristické extrémně krátkou dobou udržení energie a velkou hustotou jader. Druhý přístup pracuje s nízkou hustotou jader při delší době udržení energie. Tento způsob je označován jako magnetické udržení [2].

2.3.4 Fúzní paliva

První generace fúzních paliv se bude zaměřovat na reakci deuteria a tritia. Výhoda této reakce spočívá v největším energickém zisku při nejnižších potřebných podmínkách pro fúzi. Jejím hlavním rozdílem od druhé a třetí generace je vysoká produkce neutronů. Při D-T reakci dochází k odnášení 80 % energie z reakce vysoce energickými neutrony. Potřebný pokrok ve fúzních palivech je dán především radiačním poškozením způsobeným neutronem z fúzní reakce. Značnou výhodou druhé a třetí generace fúzních paliv bude množství energie odnášené neutronem. Ve druhé generaci se bude jednat pouze o pár procent a ve třetí generaci už nebude docházet k odnášení energie pomocí neutronů. Výhodou snížení produkce neutronů spočívá v lepším magnetickém udržení všech částic a následném snížení poškození komponentů fúzní elektrárny. Bude také docházet k uvolnění větší části energie ve formě nabitých částic. Toto povede k možnosti přímé přeměny fúzní energie na elektrickou energii namísto přeměny fúzní energie na tepelnou energii a následné přeměně na elektrickou energii. Tato přímá přeměna energie bude mít účinností 70 % nebo vyšší. Jedná se zhruba o dvojnásobnou účinnost, než která bude dosažena v první generaci. V první generaci se bude jednat o přeměnu energie neutronu na tepelnou energii, která bude roztáčet turbínu. Hlavní nevýhody druhé generace spočívají především ve 4 až 5-krát vyšší teplotě a 4 až 5-krát lepšími podmínkami udržení. Pro třetí generaci jsou požadavky ještě vyšší [19].

	vstup	výstup	energie
První generace	D+T	n+He ⁴	17.6 MeV
	D+D	n+He ³	4.03 MeV
		p+T	3.27 MeV
Druhá generace	D+He ³	p+He ⁴	18.4 MeV
Třetí generace	p+B ¹¹	3He ⁴	8.7 MeV
	He ³ + He ³	2p+He ⁴	12.9 MeV

Tab. 2-1 Fúzní paliva [19]

3 UDRŽENÍ PLAZMATU

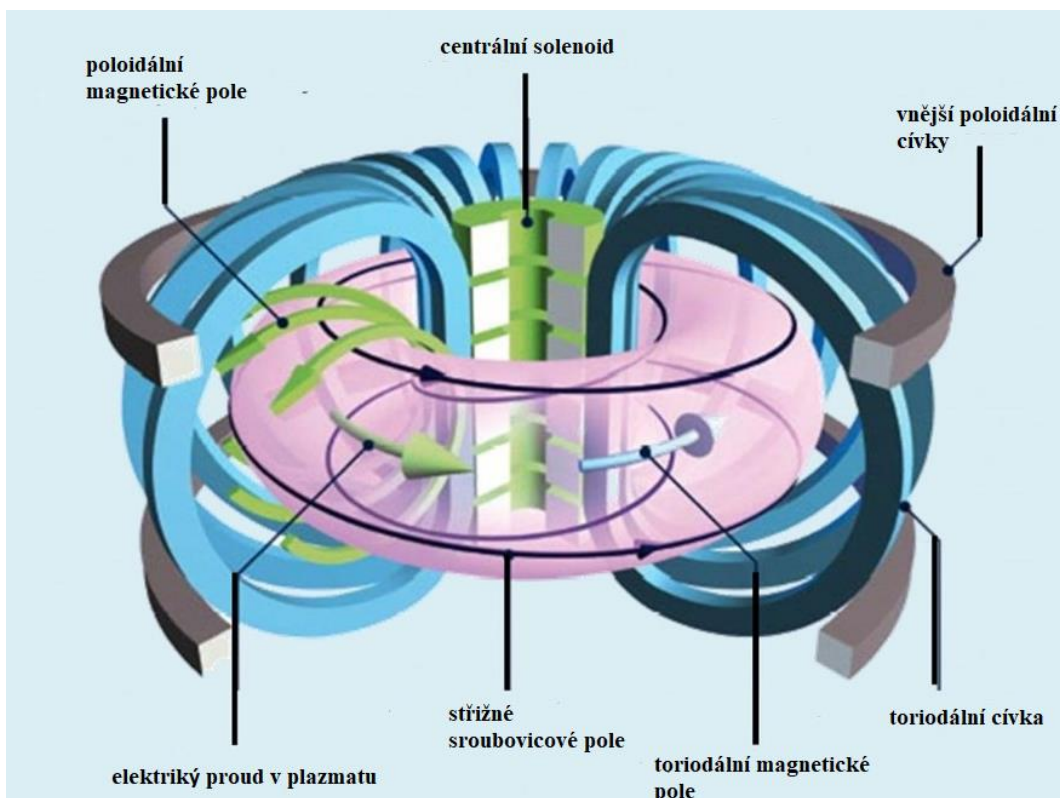
Každá fúzní reakce je charakterizována teplotou, která musí být dosažena, aby mohlo dojít k fúzi. Pro fúzi deuteria a tritia je tato teplota 100 milionů stupňů Celsia. Po zahřátí plazmatu na tuto teplotu je důležité udržet tuto energii uvnitř plazmatu. Udržení této energie na dostatečně dlouhou dobu je nezbytné k tomu, aby došlo k fúzi. Pokud bude docházet k výměně energie mezi plazmatem a stěnami reaktoru, plazma se bude ochlazovat a může dojít k roztavení reaktoru. Bylo vyvinuto několik způsobů udržení, ale nejperspektivnější jsou dva přístupy, které by nejspíše mohly splnit požadavky na udržení plazmatu. Jsou to magnetické udržení a inerciální udržení. Tato dvě udržení plazmatu se od sebe odlišují tím, jakým způsobem splní Lawsonovo kritérium – viz kapitola 2.3.3.3 Lawsonovo kritérium [20].

3.1 Magnetické udržení

Tato metoda funguje na principu generování silného magnetického pole k udržení horkého plazmatu a zabránění kontaktu plazmatu se stěnami reaktoru. Magnetická pole drží plazmat uvnitř reaktoru z důvodu elektrického náboje oddělených iontů a elektronů, které následují magnetické siločáry [20].

3.1.1 Tokamaky

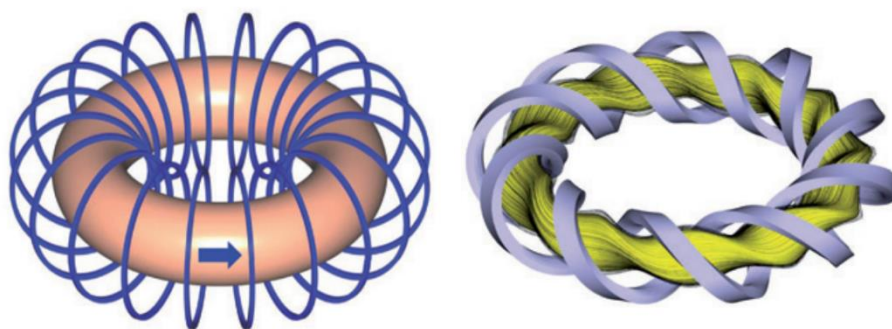
Tokamak obsahuje soustavu magnetických cívek, které generují magnetické pole ve vertikálním a horizontálním směru. Toto magnetické pole tvaruje a určuje pohyb nabitých částic. Nabité částice jsou nuceny následovat magnetické siločáry. Nejsilnější magnetické pole vytvářejí toriodální cívky, čímž plazma udržují stabilním uvnitř komory – „dosažitelný fúzní výkon reaktoru roste se čtvrtou mocninou velikosti toroidálního pole“ [1]. K tomu dochází uvnitř plazmatu k indukci velkého proudu pomocí centrálního solenoidu, který je tvořen magnetickými cívkami umístěnými v ose toroidu reaktoru. Tento indukovaný proud přispívá k poloidálnímu magnetickému poli. Toroidální a poloidální magnetické pole stáčí plazma do tvaru mírné šroubovice. K poloidálnímu magnetickému poli dále přispívají vnější cívky poloidálního pole, které udržují silovou rovnováhu v plazmatu a tvarují plazma. Deformace tvaru plazmatu totiž způsobují jeho nestabilitu [2][20].



Obr. 3-1 Magnetické udržení – Tokamak [21]

3.1.2 Stelarátory

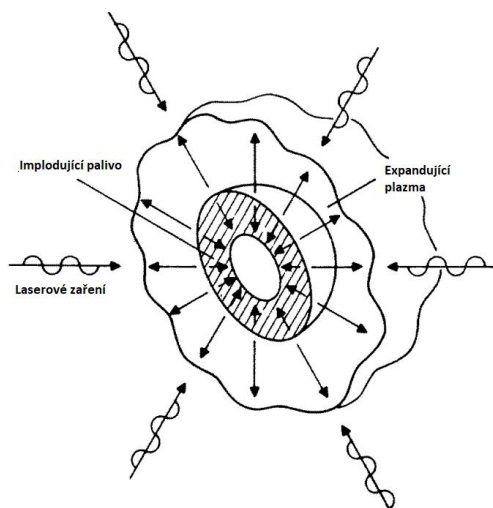
Tvar plazmatu je v případě stelarátoru udržován pomocí šroubovicových magnetických siločar. Magnetické pole je generováno cívkami, které také mohou mít šroubovicový tvar. Na rozdíl od tokamaku neteče v plazmatu stelarátoru žádný elektrický proud, a proto je nutné v tomto typu zařízení poloidální magnetické pole vytvářet systémem složitých dodatečných cívek. Stelarátory mají oproti tokamakům větší stabilitu a zároveň lepší kontrolu zahřívání plazmatu. Jejich hlavní nevýhodou je tedy celková složitost [20].



Obr. 3-2 Magnetické udržení plazmatu v zařízeních tokamak (vlevo) a stelarátor (vpravo). Modrá kruhy a šedé šroubovice znázorňují magnetické cívky. Modrá šiba znázorňuje elektrický proud v plazmatu [2]

3.2 Inerciální udržení

V případě inerciálního udržení jsou podmínky potřebné k dosažení jaderné fúze zajištěny laserovými paprsky o intenzitě v řádech $10^{14} - 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Rovnoměrně je zasažen kulový cíl - palivový terčik. Energie je absorbována na povrchu a dochází ke vzniku vysokoteplotního plazmatu o energiích 2-3 keV a extrémně vysokého tlaku až několika stovek megabarů. Tento tlak způsobí akceleraci vnějších vrstev terčiku směrem do středu, jak znázorňuje *Obr. 3-3*. Poté, co se akcelerované palivo srazí ve středu, dochází k dalšímu nárůstu jeho tlaku a teploty. Pokud je geometrie cíle dostatečně symetrická, střed palivového cíle bude mít tepelnou energii 5-10 keV a začne docházet k fúzní reakci. Původní velikost cíle je přibližně tři mm, po dodání energie laserem dojde k implozi na poloměr okolo třech μm [22].



Obr. 3-3 Inerciální udržení [22]

3.2.1 Způsob dodávání energie palivu

Z pohledu zapálení jaderné fúze můžeme inerciální udržení rozdělit na dva způsoby. V prvním případě se jedná o přímé zapalování, ve kterém jsou laserová svazky nasměrovány přímo na terčik s palivem. Naopak v druhém případě je energie laseru přeměněna na měkké rentgenové záření, které je následně absorbováno na povrchu terčiku. Výhoda nepřímého zapálení spočívá v tom, že terčik je zasahován ze všech směrů. Na druhou stranu dochází ke ztrátě části energie během přeměny na rentgenové záření [7].

4 RADIAČNÍ POŠKOZENÍ

„Radioaktivita je schopnost atomových jader vysílat záření“ [14]. Tato schopnost má buď samovolný charakter – přirozená radioaktivita, nebo se jedná o radiaci vynucenou – umělá radioaktivita. Přirozená radioaktivita nastává především při přechodu atomového jádra z excitovaného kvantového stavu do základního kvantového stavu. Také může nastat při přechodu atomového jádra do stabilnější konfigurace, popř. do konfigurace, která ke stabilnější konfiguraci vede.

Radiační efekty jsou v přírodě časté, jejich zdroji jsou například kosmické záření a přeměna izotopů v horninách na Zemi. Další zdroje radiačního záření jsou uměle vytvořené pro vědecké a technické aplikace. Mezi tyto zdroje například patří jaderné elektrárny a v budoucnu fúzní elektrárny.

Při využívání vysoce energetických částic musíme počítat s dvojím efektem:

- žádoucím – energie částice je přeměněna na tepelnou energii a následuje produkce elektrické energie,
- nežádoucím – poškození částí technologického zařízení, které vyvolá emitovaná částice. Částice poškozují použité materiály konstrukce a tím degradují její důležité vlastnosti do bodu, kdy zařízení již nebude moci plnit svůj účel.

[14, 23]

Dalším problémem je bezpečné uchování vysoce radioaktivního odpadu vzhledem k jeho:

- aktivitě – míra radioaktivity neboli „rychlost přeměny atomových jader“ [14];
- poločasu přeměny – „čas, za který se samovolně přemění z daného vzorku právě polovina původního počtu atomových jader“ [14].

[14]

4.1 Radiační poškození fúzních reaktorů

Pro následující popis radiačního poškození budeme pracovat s aktuálně dosažitelnou reakcí D+T. Problémem jsou vysoce energetické neutrony, které unikají z plazmatu. Především poškozují konstrukční materiály reaktoru. Dále indukují sekundární radioaktivitu, což vyžaduje zvýšené nároky při recyklaci použitých materiálů a jejich zpracování jako nebezpečný odpad po ukončení činnosti elektrárny. Další problém spočívá v tepelném záření, které způsobuje horké plasma. Toto tepelné záření bude nejintenzivnější při přímém kontaktu plazmatu se stěnami reaktoru a může dosahovat až 7 MW/m^2 . Tyto nepříznivé tepelné podmínky mohou nastávat například při nestabilitách plazmatu, při spouštění a odstavování reaktoru [14,23].

4.1.1 Radiační poškození při magnetickém udržení

Pokud dojde k reakci energického neutronu s prvním atomem první stěny nebo konstrukcí obalu, může dojít k jeho vyražení z jeho původního místa v krystalické mřížce. Vyražený atom může zůstat v mezipoloze mřížky jako tzv. intersticiální a na jeho původním místě se ve krystalické mřížce objeví vakance. Obvykle má však tento vyražený atom dostatečnou energii na posunutí i dalších atomů. Toto poškození se kvantifikuje jako průměrný počet pousnutých atomů na atom (displacement per atomu – dpa) během života konstrukce. V místech největšího neutronového toku, jako je první stěna, se očekává poškození až stovek dpa. Protože, tím bude pevnost materiálu podstatně snížena, bude nutné v průběhu životnosti reaktoru některé části stěn opakovaně vyměňovat.

Neutron také může reagovat s atomem v krystalické mřížce a zanechat na jeho místě transmutovaný atom nebo atomy. Touto reakcí se obvykle z atomu stane atom radioaktivní. Očekává se, že tento jev bude hlavním zdrojem radioaktivity ve fúzních reaktorech.

Další možností je vyražení protonu nebo alfa částic neutronem. Důležité jsou reakce neutronů s alfa částicemi u neutronů s energií 14 MeV z fúze deuteria s tritiem. V krystalické mřížce se vytvoří vodíkové a heliové atomy, tím že protony a alfa částice z těchto reakcí zachytí elektron. Nově vzniklé atomy se spojují a tvoří v krystalické mřížce bublinky plynu, čímž se narušuje konstrukce zařízení. V neposlední řadě mohou způsobit poškození krystalické mřížky materiálů i odrazy energetických produktů reakcí [14].

4.1.2 Radiační poškození při inerciálním držení

V případě inerciálního udržení je, vedle výše uvedených negativních vlivů pro magnetické udržení, potřeba vzít v potaz i rentgenové záření. Poté, co laserový paprsek zasáhne povrch palivové kapsle, dojde k vytvoření plazmatu na povrchu palivové kapsle. Elektrony uvnitř plazmatu budou urychlovány silným elektrickým polem na velké energie (horké elektrony). Při pohybu těchto elektronů skrz palivovou kapsli se vytvoří tzv. brzdné záření. Toto brzdné záření je zdrojem rentgenového záření [23].

4.2 Volba materiálů na stěny reaktoru

Pro materiály stěn reaktoru jsou důležité i jejich aktivační vlastnosti. Správnou volbou těchto materiálů lze zajistit snazší manipulaci a snížit celkové množství radioaktivního odpadu. Důležitou vlastností je i čistota a kvalita zvolených konstrukčních materiálů, která zásadně ovlivňuje celkovou aktivaci konstrukce. Pro použití v první stěně reaktoru, popřípadě v dirvertoru se uvažuje

především o třech skupinách materiálů: martenzitická ocel, slitiny vanadu a křemíko-uhlíkové kompozity.

Nejrozšířenějším materiálem je martenzitická ocel, která se používá například i u štěpných reaktorů a má tudíž rozsáhlou databázi vlastností v radiačním prostředí. Výhodou je i to, že se využívá také v aplikacích, kde se vyskytují vysoké teploty. Kvůli zlepšení aktivačních vlastností je složení této látky speciálně modifikováno - například je nahrazován niob vadiem, titanem nebo wolframem. Specifikem je nutnost kontroly množství uloženého helia v krystalické mřížce.

Další skupinou vhodných materiálů se jeví slitiny vanadu, u kterých jsou prováděny studie ovlivňování jejich vlastností ozařováním. Většina prvků, které tvoří vanadové slitiny, totiž patří mezi nízkoaktivovatelné. Jejich hlavní nevýhodou je křehnutí mimo rozmezí teplot 400-650 °C, což znamená příliš úzký rozsah pracovních teplot reaktoru.

Poslední skupinou studovaných materiálů pro fúzní reaktory jsou křemíko-uhlíkové kompozity. Původně byly vyvíjeny pro potřeby letectví a kosmonautiky. Jsou perspektivní z důvodu velké mechanické pevnosti i při vysokých teplotách a dobrých aktivačních vlastností. Mezi nevýhody patří problémy s jejich utěsňováním, prováděním vzájemných spojů a spojováním s kovy [14].

5 PRODUKCE TRITIA

Dosavadní pokusy o jadernou fúzi pracují s reakcí D a T. Vzhledem k tomuto faktu je důležité vyřešit možné způsoby produkce tritia v reaktoru, protože tritium se na naší planetě ve větším množství využitelném v průmyslovém měřítku prakticky nevyskytuje. Produkci tritia v termojaderných reaktorech plní tzv. blanket, který navíc převádí energii neutronů na tepelnou energii, která bude v budoucnu použita k produkci elektrické energie. Tritium bude vznikat jadernou reakcí mezi materiály blanketu a neutrony. Ne všechny neutrony z reakce D+T budou moci produkovat tritium. Část neutronů se například zúčastní parazitní absorpce v konstrukci a v ochranných prvcích první stěny reaktoru. Z důvodu úbytku neutronů bude potřeba použití tzv. neutronových multiplikátorů k produkci dostatečného množství tritia.

Základní požadavky na materiály použité k produkci tritia jsou:

- 1) bezpečnost – žádná nebo nízká toxicita – způsob reakce materiálu se vzduchem, vodou a ostatními materiály blanketu,
- 2) nízká aktivace – především důležitá z pohledu zpracování odpadu, bezpečnosti při havárii, údržbě zařízení a zacházení s odpadní vodou,
- 3) dostupnost a cena – zásadní vlastnosti vzhledem k potřebě velkého množství použitého materiálu [24].

5.1 Materiály na produkci tritia

Všechny chemické prvky těžší, než He interagují s neutronem a vytváří tritium (n, T). Ovšem množství těchto interakcí (n, T) je téměř zanedbatelné. Jedním z mála prvků, které poskytují dostatečně velký účinný průřez pro reakci (n, T) s fúzními neutrony je ${}^6\text{Li}$. Reakce $n + {}^6\text{Li}$ je dokonce jedinou jadernou reakcí schopnou produkovat dostatečné množství tritia pro fúzní reaktor. Tento fakt představuje značný problém vzhledem k tomu, že Li reaguje s vodou, vzduchem i možnými komponenty blanketu. Především nastává problém, pokud budou komponenty blanketu chlazeny vodou. Další problém spočívá v nízkém bodu tání Li a nutnosti použití Li v kapalně formě. Z těchto důvodů bude pro produkci tritia použito lithium ve formě sloučeniny pro potlačení bezpečnostních a materiálových vlastností samotného Li. V této sloučenině tedy musí být prvky, které budou mít malý účinný průřez pro absorpci neutronu nebo působit jako efektivní neutronový multiplikátor. Z těchto důvodů se jako dobrá sloučenina jeví Li_4SiO_4 s poměrně velkou atomární hustotou Li. Dále představuje vcelku dobrý materiál pro produkci tritia, který převyšuje svou účinností o přibližně 3% konkurující sloučeninu Li_2TiO_3 .

Jednou z nejdůležitějších požadavků na neutronový multiplikátor je velký účinný průřez reakce ($n, 2n$) a zároveň malá parazitní absorpce, a to zejména reakce (n, γ). Dále by tyto materiály měly splňovat základní požadavky jako je bezpečnost, nízká aktivace a dobrá dostupnost a cena. Po zvážení těchto požadavků pro výběr neutronového multiplikátoru se jeví jako perspektivní pouze dva materiály. Prvním materiálem je Be i přes jeho chemickou toxicitu. Be může být výhodné z hlediska vysokého bodu tání, a tím použití v pevných rodících blanketech. Pro použití Be jako neutronový multiplikátor se preferuje použití ve formě sloučeniny, a to především z důvodů jako je snížení chemické reaktivity, snížení absorpce T a případně vyšší bod tání. Druhým materiálem je Pb, ale díky jeho nízkému bodu tání bychom ho museli používat v tekuté formě. Z tohoto důvodu musí být Pb použito ve formě slitiny a tím docílit pevného stavu materiálu při vysokých teplotách [24].

6 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části bakalářské práce jsem vytvořil simulaci v programu MCNP, který používá kód Monte Carlo. V této simulaci jsem vytvořil bodový neutronový zdroj a základní konstrukci reaktoru na principu inerciálního udržení. Dále jsem sledoval hodnoty neutronového toku na konkrétní části reaktoru a z těchto hodnot jsem vyhodnotil potenciál produkce tritia a míru aktivace materiálu reaktoru.

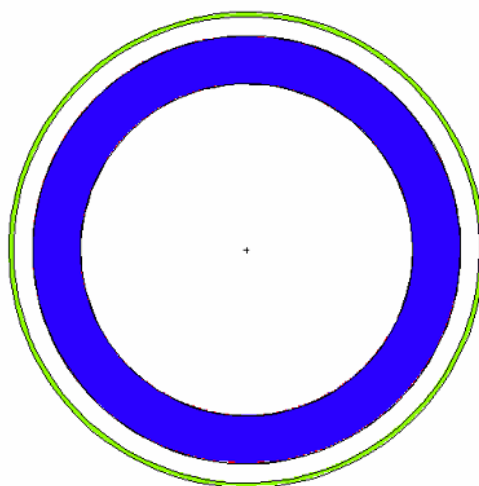
6.1 MCNP

MCNP je kód, který pracuje s principem statistické Monte Carlo metody a využívá se k výpočtům transportu částic. Pro simulaci je nutné vytvořit textový input soubor. Tento soubor bude sloužit jako vstup pro program MCNP. V souboru input vytvoříme naši problematiku pomocí konkrétních příkazů. Mezi základní parametry patří geometrie našeho objektu, použité materiály a vlastnosti těchto materiálu jako je hustota a účinný průřez. Dále můžeme specifikovat zdroj částic, kde můžeme například charakterizovat energii částic, umístění zdroje nebo i vytvořit Gaussovo rozdělení energie částic. Mezi další specifikace patří tzv. tally ve kterých specifikujeme způsob výpočtu a zobrazení výsledků simulace. Výsledkem simulace je textový soubor output, ve kterém máme výsledky požadovaného problému ve formě, kterou jsme si zvolili typem tally [25].

6.2 Model reaktoru

Na obrázku **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je znázorněna geometrie zjednodušeného modelu reaktorové nádoby. Bodový neutronový zdroj se nachází ve středu. Tento zdroj produkuje neutrony vzniklé při reakci D+T se střední energií 14,1 MeV. Prvním materiálem, se kterým může neutron reagovat je jeden centimetr tlustý F82H. Jedná se o feriticko/martenzitickou ocel s dobrými aktivačními vlastnostmi, která se bude nacházet nejbližší plazmatu. Bude zatížena největší počtem dpa a největším tepelným tokem. Jedním z nejdůležitějších požadavků na tuto vrstvu je vydržet extrémní podmínky s minimálním počtem prasklin. Pokud bude docházet k velikému množství prasklin, mohou tyto praskliny způsobit uhasnutí plazmatu. Dalším materiálem je Li_2TiO_3 se šířkou jednoho metru, který plní funkci produkci tritia ve fúzním reaktoru. Jedná se o materiál v pevné formě, který patří k jedněm z perspektivních z důvodů své jednoduchosti a jednoduché manipulace oproti tekutým typům jako je LiPb. Následuje opět centimetrová vrstva F82H. Další částí je čtyřiceti centimetrový prostor pro potrubí, který byl v simulaci vyplněn vakuem. Celá nádoba je uzavřena do nerezové

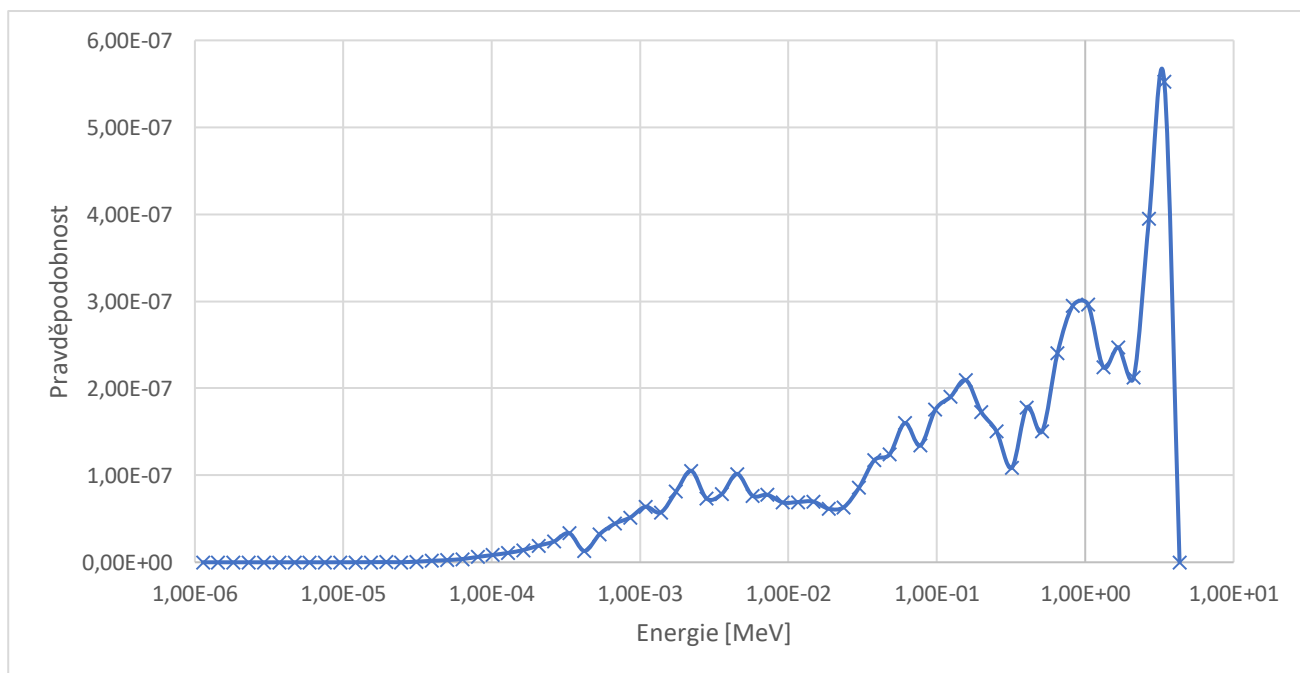
oceli SUS316 se tloušťkou deseti centimetrů. Tato nádoba je poté uložena do vody kvůli zjednodušení neutronového stínění v okolo paprskových kanálů [26].



Obr. 6-1 Model simulace

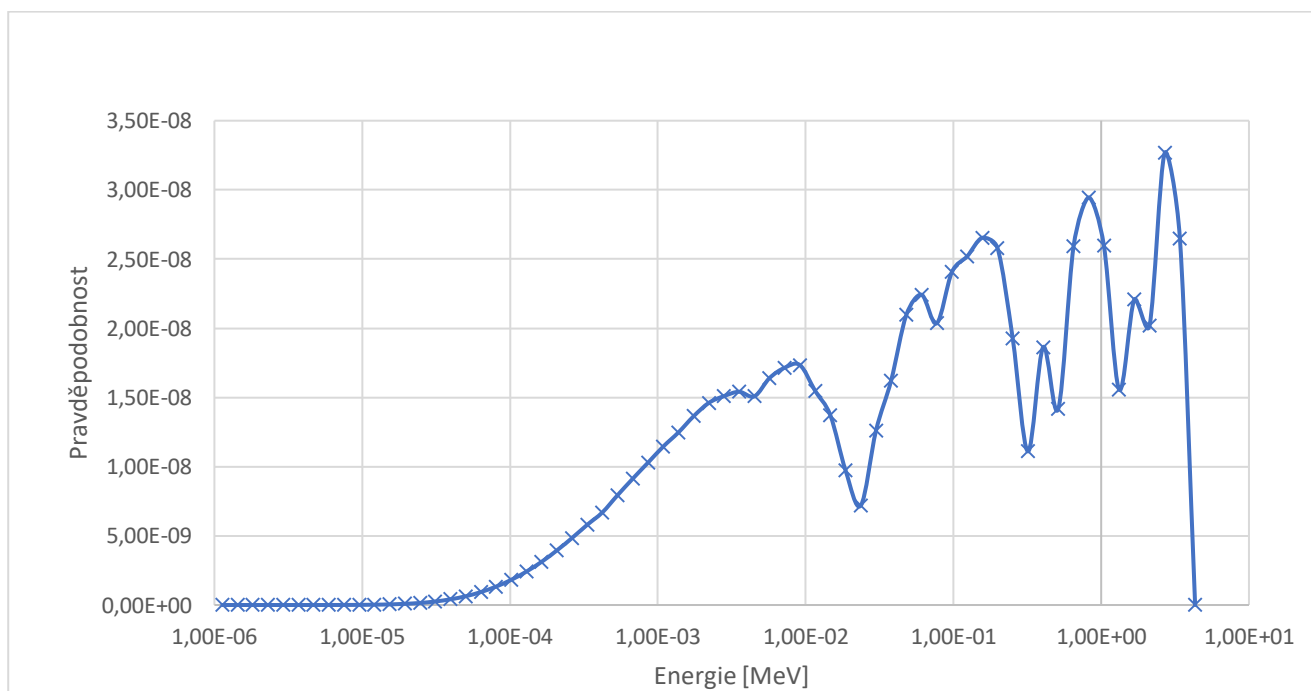
6.3 Tally F4

Pro stanovení aktivace stěn reaktoru a potenciální produkci tritia byl v souboru input vytvořeno tally F4. Výsledkem tohoto tally je střední hodnota neutronového toku v jednom cm^2 . V grafech jsou znázorněny pravděpodobnosti výskytu neutronů s příslušnými energiemi v jednom cm^2 konkrétní buňky.

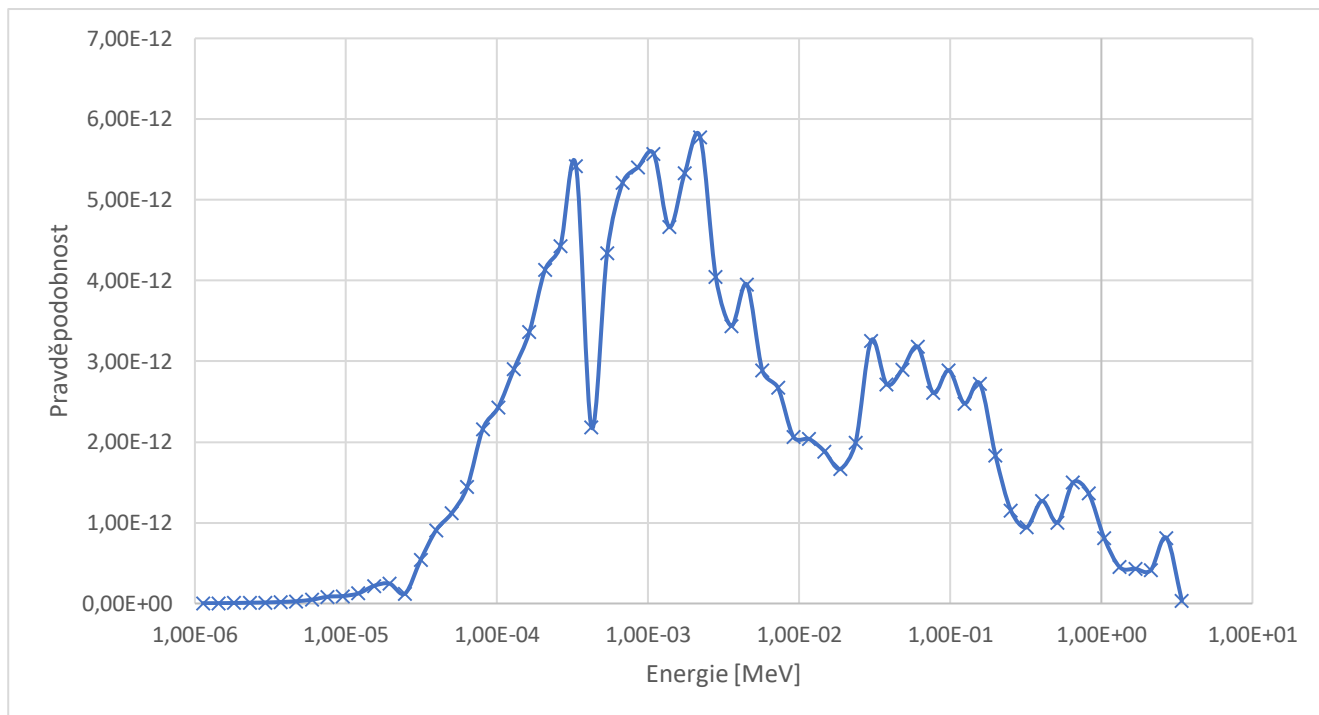


Obr. 6-2 Neutronový tok v první vrstvě F82H

V Obr. 6-2 je znázorněn střední hodnota energie neutronového toku v první stěně reaktoru. Na tuto vrstvu působí největší neutronové zatížení.

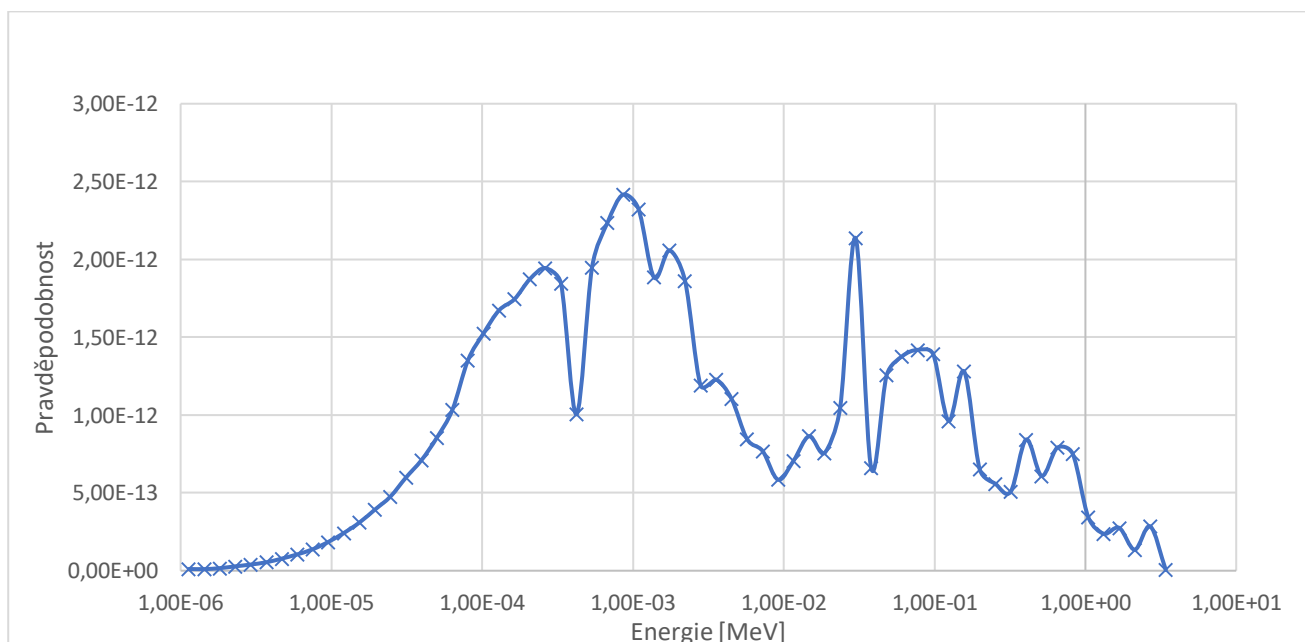
Obr. 6-3 Neutronový tok v Li₂TiO₃

Obr. 6-3 znázorňuje hodnoty pro druhou vrstvu, ve které bude docházet k produkci tritia.



Obr. 6-4 Neutronový tok v druhé vrstvě F82H

Z Obr. 6-4 vidět značný pokles jak v energiích neutronu, tak v pravděpodobnosti jejich výskytu.



Obr. 6-5 Neutronový tok ve vrstvě SUS316

Energie ve finální vrstvě jsou zobrazeny na Obr. 6-5.

Z provedených simulací můžeme spočítat míru aktivace v jednotlivých vrstvách reaktoru.

Produkci tritia můžeme stanovit v závislosti na nasimulovaném neutronovém toku a účinným průřezem pro reakci Li_7+n a vzniku tritia.

7 ZÁVĚR

Při vypracovávání této bakalářské práce jsem se seznámil s problematikou související s dosažením a udržení jaderné fúze v technologických systémech. Nutné podmínky jsou pro lidstvo extrémní, tzn. těžce dosažitelné, jak z hlediska proveditelnosti, tak i z hlediska finanční náročnosti, protože je nutné využívat nejvyspělejší technologie. Naneštěstí pro odstranění některých souvisejících problémů zatím ani technologická řešení neovládáme, a proto je nutné je složitě vyvíjet. Pokud se však lidstvu podaří ovládnout technologii jaderné fúze, získá tím nejdokonalejší známý zdroj dostatečného množství energie pro pokrytí svých potřeb a tím i vyřešení jednoho ze základních omezujících problémů dalšího rozvoje. Zatím se úspěšně dařilo dílčí problémy vývoje odstraňovat, a proto není důvod se domnívat, že tomu tak nebude i v budoucnu. Jedním z takových dílčích problémů je i radiační poškození technologického zařízení při jaderné fúzi, jehož problematiku jsem v této práci nastínil. Další problém spočívá v produkci tritia, které je nezbytné pro chod novodobých fúzních zařízení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MCCRACKEN, Garry M. a Peter E. STOTT. Fúze: energie vesmíru. Praha: Mladá fronta, 2006. Kolumbus. ISBN 80-204-1453-3.
- [2] ENTLER, Slavomír, Ondřej FICKER, Josef HAVLÍČEK, et al. Budoucnost energetiky: jaderná fúze: Výzkumný program: Systémy pro jadernou energetiku. 1. Praha: Středisko společenských činností AV ČR, 2019.
- [3] Outline History of Nuclear Energy [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- [4] Hydrogen Bomb - 1950 [online]. 2014 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.atomicheritage.org/history/hydrogen-bomb-1950>
- [5] The ITER History [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.iter.org/proj/iterhistory>
- [6] CONN, Robert W. Nuclear fusion [online]. 1998 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/nuclear-fusion#accordion-article-history>
- [7] KIKUCHI, MITSURU, KARL LACKNER a MINH QUANG. FUSION PHYSICS. ISBN 978-92-0-130410-0.
- [8] Prospects for Low Cost Fusion Development. Spojené státy americké: The MITRE Corporation, 2018.
- [9] Nuclear Fusion [online]. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://nuclearconnect.org/know-nuclear/science/nuclear-fusion>
- [10] KULHÁNEK, Petr. Úvod do teorie plazmatu. Praha: AGA, 2018. ISBN 978-80904582-2-2.
- [11] Termojaderné fúze. HOLLIDAY, D., R. RESNIC a J. WALKER. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM a PROMETHEUS Praha, 2000.
- [12] VAZEBNÁ ENERGIE JADER: Jaderné síly [online]. [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: https://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.6.3
- [13] Vazebná energie jádra. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/799-vazebna-energie-jadra>
- [14] RAČEK, Jiří. Jaderná zařízení. Vyd. 2. Brno: Novpress, 2013. ISBN 978-80-214-4745-5.

- [15] Khan Academy: What is the Maxwell-Boltzmann distribution [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/temp-kinetic-theory-ideal-gas-law/a/what-is-the-maxwell-boltzmann-distribution>
- [16] HyperPhysics [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: astr.gsu.edu/hbase/hframe.html
- [17] KIKUCHI, MITSURU, KARL LACKNER a MINH QUANG. FUSION PHYSICS. ISBN 978-92-0-130410-0.
- [18] MCCRACKEN, Garry M. a Peter E. STOTT. Fúze: energie vesmíru. Praha: Mladá fronta, 2006. Kolumbus. ISBN 80-204-1453-3.
- [19] KULCINSKI, G. L. a J. F. SANTARIUS. Advanced fuels under debate. Nature. 1998, 396(6713), 724-725. DOI: 10.1038/25456. ISSN 0028-0836. Dostupné také z: <http://www.nature.com/articles/25456>
- [20] GIRKA, Igor. Nuclear Fusion: One Noble Goal and a Variety of Scientific and Technological Challenges. InTechOpen, 2019. ISBN 9781789857887.
- [21] HAUPT, Kirsten. Fusion machines: Searching for the perfect shape [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.iter.org/newsline/-/3037>
- [22] NAKAI, S a H TAKABE. Principles of inertial confinement fusion - physics of implosion and the concept of inertial fusion energy. Reports on Progress in Physics. 1996, 59(9), 1071-1131. DOI: 10.1088/0034-4885/59/9/002. ISSN 0034-4885. Dostupné také z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/59/9/002>
- [23] TRACHENKO, K., E. ZARKADOULA, I.T. TODOROV, M.T. DOVE, D.J. DUNSTAN a K. NORDLUND. Modeling high-energy radiation damage in nuclear and fusion applications.(Report). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Elsevier B.V, 2012, (277, 6). ISSN 0168-583X.
- [24] HERNÁNDEZ, F.A. a P. PERESLAVTSEV. First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors. Fusion Engineering and Design. 2018, 137, 243-256. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.09.014. ISSN 09203796. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920379618306392>
- [25] BRIESMEISTER, Judith F. MCNP—A General Monte Carlo N—Particle Transport Code [online]. 4C. 2000 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://s3.cern.ch/inspire-prod-files-7/78c669e8d3bb59ccf6fb868a6061450c>

- [26] NORIMATSU, T., Y. KOZAKI, H. SHIRAGA, H. FUJITA a K. OKANO. Conceptual design and issues of the laser inertial fusion test (LIFT) reactor—targets and chamber systems. *Nuclear Fusion* [online]. 2017, 57(11) [cit. 2020-06-10]. DOI: 10.1088/1741-4326/aa7f07. ISSN 0029-5515. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/aa7f07>